

Мухин Р.С., Кокорин А.Ф.
Romah76b@mail.ru

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПЕРЕХОДА НА ЦИФРОВОЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В СПЕКТРОСКОПИИ

Аннотация. Целью исследования является обоснование перспектив перехода от использования аналогового спектрометрического тракта к цифровому с использованием алгоритма «развертки-свертки» на примере Лаборатории Ядерных Реакций Объединенного Института Ядерных Исследований.

Ключевые слова: цифровой спектрометрический тракт, цифровая обработка информации, свертка, развертка, восстановление формы импульса.

Abstract. The aim of the research is to substantiate the prospects for the transition from using the analog spectrometric tract to the digital one using the unfolding-synthesis technique on the example of the Nuclear Reactions Laboratory in the Joint Institute for Nuclear Research.

Keywords: digital spectrometric tract, digital pulse processing, convolution, unfolding, pulse shaping.

Введение

В Лаборатории ядерных реакций им. Флерова ОИЯИ г. Дубна Московская обл. проводятся эксперименты по изучению реакций полного слияния с тяжелыми ионами. В процессе взаимодействия мишени с пучком тяжелых заряженных частиц образуется большое количество изотопов, период полураспада которых составляет единицы микросекунд или даже меньше.

Чтобы получать больше причинно-следственной информации о реакциях полного слияния с тяжелыми ионами необходимо иметь временное разрешение исследовательской установки менее 1 мкс. Однако с существующим аналоговым измерительным трактом это оказалось невозможным.

Это связано с тем, что используемые на данный момент измерительные системы представляют собой аналоговые измерительные тракты (упрощенная схема показана на рис. 1), работающие, как правило, по стандарту КАМАК. В соответствии с этим стандартом синхронизирующая частота составляет порядка 1 МГц. Учитывая временные разрешения таких частей измерительного тракта, как схема совпадений и АЦП, общее временное разрешение измерительной установки составляет десятки микросекунд.

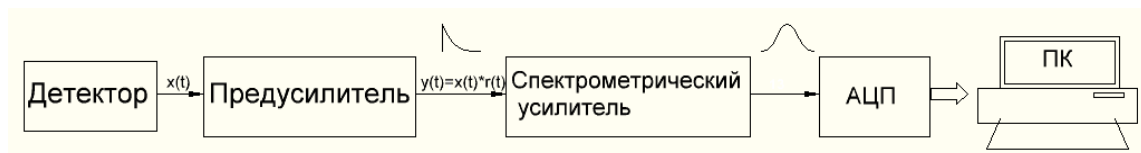


Рисунок 1 – Упрощенная схема аналогового спектрометрического тракта

Перспективным выглядит переход к использованию цифровых спектрометрических трактов. Это потенциально позволит получить временное разрешение исследовательской установки порядка 10^2 - 10^3 наносекунд.

Возвращаясь к модели аналогового тракта необходимо разобрать механизм формирования выходного сигнала с предусилителя. Сигнал $x(t)$, выходящий с детектора грубо можно представить в виде дельта-функции (т.к. его длительность много меньше длительности сигнала $y(t)$). Далее сигнал попадает на зарядочувствительный предусилитель, выходной сигнал которого $y(n)$ представляет собой экспоненту. Спектрометрический усилитель производит формирование сигнала, такой формы, чтобы можно было без проблем считать амплитудное значение, и обеспечивающей наилучшее отношение сигнал/шум. Далее сформированный колоколообразный сигнал поступает на вход АЦП и данные об амплитуде сигнала поступают на ПК.

Преобразование входного сигнала $x(t)$ в выходной $y(t)$ математически описывается (при условии, что система линейна и времяинвариантна) операцией свертки:

$$y(t) = x(t) * r(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) r(t - \tau) d\tau \quad (1)$$

где $x(t)$ – входной сигнал, приходящий с детектора (см рис. 1), $y(t)$ – выходной сигнал с предусилителя, $r(t)$ – реакция предусилителя на входной сигнал.

Уравнение (1) дано для непрерывно изменяющегося времени. В случае, если время будет дискретизированным, то интеграл в формуле будет заменен на сумму:

$$y(n) = \sum_{i=-\infty}^n x(i) r(n - i) \quad (2)$$

где $x(i)$ – входной дискретизированный сигнал, приходящий с детектора (см рис. 1), $y(i)$ – выходной дискретизированный сигнал с предусилителя, $r(i)$ – реакция предусилителя на входной сигнал.

Основной идеей цифрового измерительного тракта является восстановление формы импульса, получаемого непосредственно с детектора.

Механизм восстановления сигнала наиболее наглядно виден на примере интегрирования и дифференцирования (формулы 3-4).

$$y(n) = \frac{d}{dt} x(n) \quad (3)$$

$$x(n) = \int y(n) = \int \frac{d}{dt} x(n) \quad (4)$$

Таким образом, для преобразования импульса $y(n)$, получаемого на выходе предусилителя (рис. 1), обратно во входной импульс $x(n)$, зная реакцию предусилителя на входной сигнал, необходимо произвести операцию обратную свертке (формула 5). В англоязычной литературе эту операцию называют «unfolding», что дословно можно перевести как «развертка». Далее в тексте мы также будем использовать это название.

$$\begin{aligned} y(n) &= x(n) * r(n) \\ x(n) &= y(n) * r'(n) \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, для реализации развертки необходимо вычислить «обратную реакцию» $r'(n)$ системы.

Развертка дает нам возможность определить форму импульса, вышедшего с детектора, что потенциально позволяет определять наложения импульсов программно, без использования схем совпадений, что, в свою очередь, позволяет уменьшить временное разрешение измерительного тракта.

Для получения информации об энергии частицы, зарегистрированной в детекторе, необходимо снять значение амплитуды импульса $x(n)$. Т.к. упрощенно импульс $x(n)$ мы считаем дельта-функцией, то встает необходимость привести его к какому-либо виду с наилучшим показателем отношения сигнал/шум.

Треугольный сигнал обладает наилучшим отношением сигнал/шум [1]. Однако, при работе с треугольным сигналом проявляется два недостатка:

- 1) Из-за остроконечности вершины импульса, данная форма сигнала является неудобной для последующих схем оцифровки амплитуды;
- 2) баллистический дефицит – явление уменьшения амплитуды выходного сигнала, связанное с увеличением длительности фронта входного, которое проявляется при больших нагрузках детектора. Нивелировать этот эффект в аналоговых трактах удастся использованием фильтров с переменными параметрами (так называемыми аналоговыми процессорами) [1].

При небольших нагрузках используется формирование колоколообразного сигнала, обладающего немного уступающим отношением сигнал/шум по сравнению с треугольным. В цифровых же трактах используется преобразование

выходного сигнала с детектора $x(n)$ в трапецеидальный. Структурная схема цифрового спектрометрического тракта изображена на рис. 2.

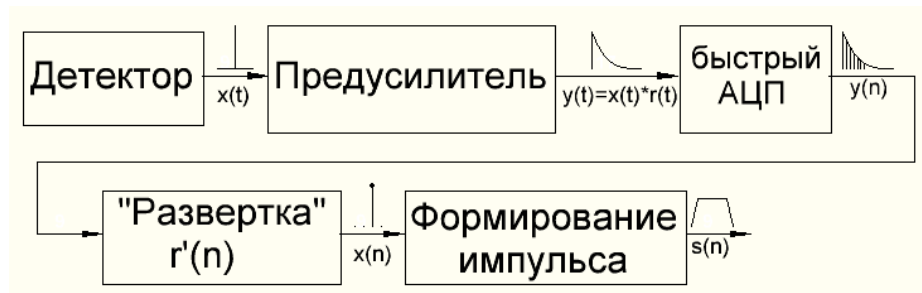


Рисунок 2 – Структурная схема цифрового спектрометрического тракта.

Разработке и обоснованию алгоритма посвящено много литературы, будем основывать свои рассуждения на алгоритме, описанном в [2]. Данный алгоритм заключается в том, чтобы реализовать операцию свертки с использованием элементарных алгебраических действий: сложении, вычитании, умножении на константу и сдвигом элементов массива. Согласно [2] операция «развертки» для экспоненциально спадающего сигнала (формула 6) с основанием экспоненты a представляет собой (формула 7):

$$y(n) = \begin{cases} a^n, n \geq 0 \\ 0, n < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$x(n) = M[y(n) - y(n-1)] + y(n-1) \quad (7)$$

где, $x(n)$ восстановленный входной сигнал (см. рис 2), $y(n)$ – сигнал с выхода АЦП, M – фактор, определяемый как:

$$M = \frac{1}{1-a} \quad (8)$$

Далее полученный восстановленный сигнал $x(n)$ необходимо преобразовать в трапецеидальный сигнал $s(n)$ (см. рис 2) той же амплитуды, что и $x(n)$. Реализуется это опять-таки с помощью свертки двух сигналов: восстановленного и заранее подготовленной трапеции с известными параметрами $f(n)$. Подбор параметров трапеции (время нарастания и продолжительность плоской вершины) подбираются в зависимости от материала детектора

$$s(n) = x(n) * f(n) \quad (9)$$

Дополнительные сложности появляются, когда сигнал приходящий на АЦП представляет собой сумму двух экспонент, созданных реакциями от двух блоков, тогда сигнал $y(n)$ можно записать как:

$$y(n) = Aa^n + Bb^n = y_a(n) + y_b(n) \quad (10)$$

где, a и b – основания первой $y_a(n)$ и второй $y_b(n)$ экспоненты.

Для решения этой задачи используются алгебраические свойства свертки: коммутативность и ассоциативность

$$y_a(n) = [x_A(n) + x_B(n)] * r_A(n) = A\delta(n) + x_B(n) + r_A(n) \quad (11)$$

где $a^n * r_A(n) = \delta(n)$

$$y_B(n) = [A\delta(n) + x_B(n) * r_A(n)] * r_B(n) = Ar_B(n) + Br_A(n) \quad (12)$$

где, $r_A(n)$ и $r_B(n)$ - реакции от двух блоков, каждый из которых задает свою экспоненту.

Тогда сигнал $y(n)$ можно записать в виде:

$$y(n) = [\delta(n) - x_B(n) * h_A(n)] * h_B(n) = h_B(n) - h_A(n) = \begin{cases} a - b, n = 1 \\ 0, n \neq 1 \end{cases} \quad (13)$$

Таким образом, восстановленный сигнал имеет форму дельта-функции амплитудой $a-b$.

Экспериментальная часть

Первые испытания алгоритмов были проведены с использованием кремниевого детектора альфа-частиц. В качестве альфа-источника использовался ОСАИ, спектр испускания которого представляет собой 3 близко расположенных дуплета, однако, из-за старения детектора, собственное энергетическое разрешение детектора не позволяет наблюдать все шесть линий и дуплеты сливаются в один пик.

Сигнал получаемый с детектора попадал на зарядочувствительный предусилитель, после чего оцифровывался быстрым 14-ти разрядным АЦП на базе NI PXIe 5170. Для реализации программной части цифрового спектрометрического тракта была выбрана среда визуального программирования LabView, т.к. она полностью совместима с блоками National Instruments. Задачей эксперимента являлось определить, удовлетворяет метод «развертки-свертки» требованиям по энергетическому разрешению. Для сравнения было реализовано три алгоритма.

- 1) Свертка экспоненциального сигнала с предусилителя $y(n)$ с трапецеидальным сигналом $f(n)$ без предварительной развертки. Результатом свертки является несимметричный трапецеидальный сигнал (боковые стороны представляют из себя не линейные участки, а экспоненто-подобные). Полученный спектр приведен на рис 3а.

Необходимо отметить, что данный алгоритм не дает реального значения амплитуды сигнала. Амплитуда сигнала $s(n)$, полученного в результате свертки как минимум на 2 порядка выше амплитуды сигнала с предусилителя.

- 2) Алгоритм с разверткой сигнала с предусилителя и последующей сверткой его с трапецидальным сигналом на основе элементарных алгебраических действий. Восстановленный сигнал $x(n)$ представляет собой короткий колоколообразный импульс, который при сравнении по длительности с сигналом с предусилителя $y(n)$ можно условно считать дельта-функцией. Результатом его свертки с подготовленной трапецией $f(n)$ является симметричная трапеция $s(n)$, на середине плоской вершины которой снимается значение амплитуды. Спектр, набранный с использованием этого алгоритма приведен на рис 3б. Стоит отметить, что наиболее трудоемкой задачей является подбор характеристик (время нарастания и ширина верхнего основания) трапеции $f(n)$.
- 3) Классический метод CR-4RC. Используя встроенные функции фильтров Баттерворда в LabView был реализован аналог классического CR-4RC метода. Сигнал $y(n)$ с предусилителя сначала подали на ФВЧ первого порядка (результат на рис 8а), а затем на ФНЧ 4го порядка. Полученный спектр представлен на рис 3в.

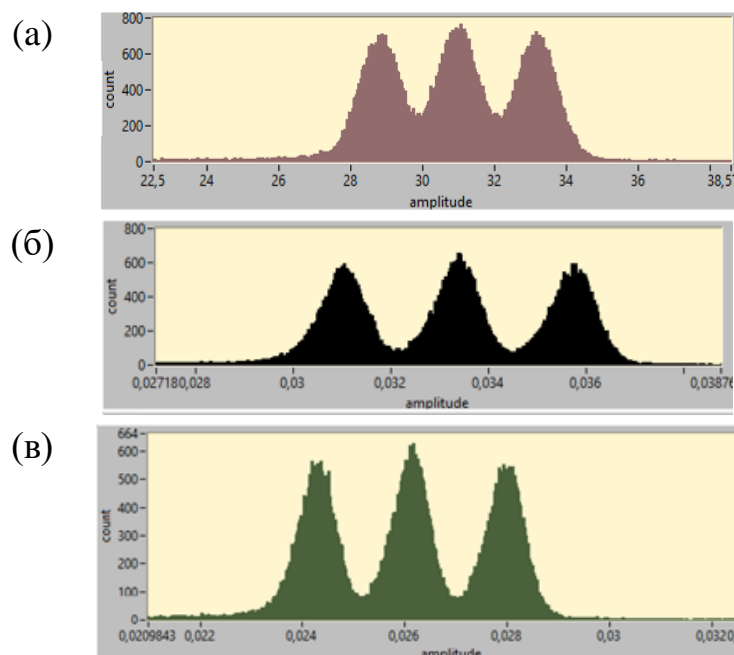


Рисунок 3 – Спектры, полученные методом свертки без предварительной развертки (а), методом развертки-свертки (б), аналогом метода CR-4RC (в).

Результаты эксперимента и выводы

Целью данных исследований было обоснование использования алгоритма свертки-развертки с точки зрения энергетической эффективности. По полученным спектрам видим, что энергетическое разрешение данного алгоритма не уступает классическому методу CR-4RC.

Спектр, набранный без предварительной развертки имеет худшее энергетическое разрешение из всех полученных результатов. Это наглядно показывает, что использование свертки сигнала без предварительного восстановления недопустимо и полностью обосновывает применение алгоритма «развертки-свертки»

Стоит отметить, что при использовании полупроводниковых детекторов из разных материалов, необходимо подбирать разные характеристики (ширина вершины и время нарастания) трапецеидального сигнала $f(n)$. Пока что подбор нужных параметров производится методом подбора, ориентируясь на форму сигнала результата свертки $s(n) = x(n) * f(n)$. А рекомендации по выбору характеристик публикуются в отдельных статьях, полностью посвященных этой тематике. Таким образом, цифровой измерительный тракт, основанный на алгоритме развертки-свертки не является универсальным и требует подстройки под конкретную задачу

Цифровой спектрометрический тракт призван, в первую очередь, улучшить временное разрешение исследовательской установки. Эксперименты, оценивающие мертвое время таких систем будут проводиться в ближайшем будущем.

Библиографический список

1. Гаврилов Л. Е. Основы ядерной электроники. Ч. 1 / Л. Е. Гаврилов. – Москва : МИФИ, 2010. – 164 с.
2. Jordanov V. T. Unfolding-synthesis technique for digital pulse processing. Part 1 : Unfolding / V. T. Jordanov // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2016. – Vol. 805. – P. 63–71.